

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EL BALANCE POTASIO : CALCIO Y SU RELACIÓN CON EL DÉFICIT DE
PRESIÓN DE VAPOR Y LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN
TOMATE DE INVERNADERO

Tesis

Que presenta RAMIRO SALAS RIVERA
Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2019

EL BALANCE POTASIO : CALCIO Y SU RELACIÓN CON EL DÉFICIT DE
PRESIÓN DE VAPOR Y LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN
TOMATE DE INVERNADERO

Tesis

Elaborada por RAMIRO SALAS RIVERA como requisito parcial para obtener el
grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Asesor principal



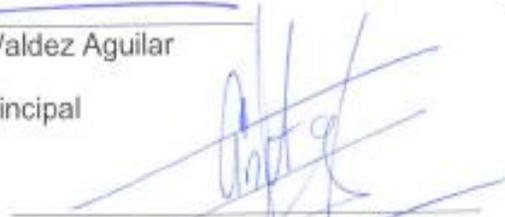
Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesor externo



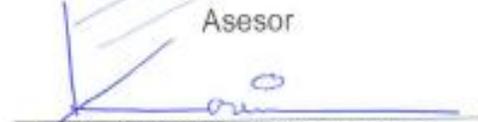
Dr. Armando Pérez Hernández

Asesor



Dr. José Antonio González
Fuentes

Asesor



Dr. Karim de Alba Romenus

Asesor



Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2019

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios, por darme salud y fuerzas en cada momento, por los momentos maravillosos y por la dicha de cumplir una meta más.

A la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme una oportunidad más de pertenecer como alumno.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca nacional y mixta que me otorgó, que fueron clave para realizar una estancia en el extranjero

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por los conocimientos, el tiempo, paciencia y todo el apoyo brindado durante mi estancia dentro y fuera del programa.

Al comité de asesores por la revisión y el aporte de conocimientos en este trabajo.

Al cuerpo académico del programa de MCH por sus conocimientos compartidos.

DEDICATORIA

A mi esposa e hija por cada momento grato que me han dado, por ser los motivos más grandes de mi felicidad.

A mis padres Elena Rivera Rivera y Máximo Salas de La Cruz, a mis hermanos Jesús Andrés y Luis Miguel, por los ánimos y palabras de aliento, por el apoyo incondicional que he recibido a cada momento para lograr cualquier obstáculo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE CUADROS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Absorción catiónica	4
Absorción y transporte de potasio	4
Función del potasio en plantas.....	6
Absorción y transporte de Calcio.....	8
Función del calcio en plantas	9
Interacción Potasio-Calcio.....	10
Calidad de tomate	11
Factores ambientales y su relación con el desarrollo del cultivo	11
Humedad relativa.....	12
Radiación.....	13
Temperatura	14
Déficit de presión de vapor	15

MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
Rendimiento y calidad de frutos	23
Respuestas agronómicas.....	31
CONCLUSIÓN GENERAL.....	32
REFERENCIAS	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura mínima, máxima y promedio registrada en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y del sexto al décimo racimo en la estación de verano (derecha).	20
Figura 2. Humedad relativa mínima, máxima y promedio registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y del sexto al décimo racimo en la estación de verano (derecha).....	20
Figura 3. Radiación fotosintéticamente activa promedio registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y verano (derecha).....	21
Figura 4. Déficit de presión de vapor (DPV) calculado a partir de temperatura y humedad relativa registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y racimo sexto al décimo en verano (derecha).	21
Figura 5. Efecto de balance K : Ca de la solución nutritiva sobre el rendimiento del primero al quinto racimo de frutos de tomate desarrollados y cosechados durante la primavera.	25
Figura 6. Efecto de balance K : Ca de la solución nutritiva sobre el rendimiento del sexto al décimo racimo de frutos de tomate desarrollados y cosechados durante el verano.	25
Figura 7. Efecto de Déficit de Presión de Vapor en dos estaciones del año sobre el rendimiento de fruto de tomate en función del balance K : Ca en la solución nutritiva.	27
Figura 8. Relación entre el Déficit de Presión de Vapor y Radiación Fotosintéticamente Activa sobre el balance K : Ca bajo los cuales se obtuvieron los rendimientos más altos en cada uno de los cinco racimos evaluados en dos estaciones del año.	29

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración de macronutrientes en soluciones nutritivas y balance K : Ca aplicadas en dos estaciones del año: primavera y verano.....	19
Cuadro 2. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva aplicada durante el desarrollo y cosecha del primero al quinto racimo de frutos de tomate durante la estación de primavera.....	23
Cuadro 3. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva aplicada durante el desarrollo y cosecha del sexto al décimo racimo de frutos de tomate durante la estación de verano.....	24
Cuadro 4. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva sobre la calidad de frutos de tomate durante el desarrollo y cosecha del primero al quinto racimo de frutos en la primavera.	30
Cuadro 5. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva sobre la calidad de frutos de tomate durante el desarrollo y cosecha del sexto al décimo racimo de frutos en el verano.	31

RESUMEN

EL BALANCE POTASIO : CALCIO Y SU RELACIÓN CON EL DÉFICIT DE
PRESIÓN DE VAPOR Y LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA EN
TOMATE DE INVERNADERO

POR
RAMIRO SALAS RIVERA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR.-ASESOR

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2019

RESUMEN

La producción de tomate en invernadero demanda el conocimiento de factores técnicos como el manejo de la solución nutritiva y su interacción con las condiciones del ambiente. Desbalances entre nutrimentos como el potasio (K) y calcio (Ca) pueden ocurrir en la solución nutritiva, por lo que el presente estudio se realizó con el objetivo de determinar el balance óptimo de K y Ca en función del déficit de presión de vapor (DPV) y radiación fotosintéticamente activa (RFA) prevalecientes durante el desarrollo de los frutos de los primeros 10 racimos en tomate; los primeros cinco racimos se desarrollaron durante la primavera, mientras que los racimos sexto al décimo durante el verano. Las plantas se irrigaron con soluciones nutritivas cuyos balances K : Ca fueron: 0.54, 0.64, 0.78, y 0.82. Los balances no afectaron calidad de frutos en primavera, aunque en verano, los balances 0.64 y 0.78 redujeron los sólidos solubles. En primavera, el rendimiento de fruto en cada uno de los cinco racimos estuvo influenciado por el balance K : Ca así como por el DPV; los racimos tuvieron una mayor producción de fruto cuando el balance K : Ca fue de 0.64 y el DPV fue de 2.81 kPa. Durante el verano, el rendimiento más alto en frutos fueron las plantas tratadas con un balance de 0.54 y el DPV fue 2.50 o 2.74 kPa. El balance K : Ca durante la primavera, se correlacionó negativamente con el DPV, sin embargo, en el verano, la correlación fue positiva. En primavera, el balance K : Ca óptimo debe ser de 0.78–0.82 al subir la RFA hasta un máximo de 102–142 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que niveles extremos de RFA (bajo: 99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y alto: 289 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) deben ir acompañados de una reducción en el balance K : Ca; una tendencia similar fue observada durante el verano.

Palabras clave: relaciones iónicas, balance de cationes, temperatura, humedad relativa.

ABSTRACT

THE POTASIUUM : CALCIUM BALANCE AND ITS RELATIONSHIP WITH THE
VAPOR PRESSURE DEFICIT AND PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE
RADIATION IN GREENHOUSE TOMATO

BY
RAMIRO SALAS RIVERA

MASTER OF SCIENCE OF HORTICULTURE
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR-ADVISOR

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2019

ABSTRACT

Greenhouse tomato production requires skills such as the management of the nutrient solution and its interaction with environmental conditions. Unbalances between nutrients such as potassium (K) and calcium (Ca) can occur in the nutrient solution, so that the present study was conducted in order to determine the optimal balance of K and Ca depending on the vapor pressure deficit (VPD) and photosynthetically active radiation (PAR) prevailing during the development of the fruits of the first 10 trusses in tomato; The first five trusses developed during the spring, while the trusses sixth to tenth developed during the summer. The plants were irrigated with solutions whose K : Ca balance was: 0.54, 0.64, 0.78, and 0.82. The balance did not affect fruit quality in spring, although in summer, balances 0.64 and 0.78 reduced soluble solids. In spring, fruit yield in each of the five trusses was influenced by the K : Ca balance as well as by the VPD; the trusses had a higher fruit production when the K : Ca balance was 0.64 and the VPD was 2.81 kPa. During the summer, the highest yield in fruits was the plants treated with a balance of 0.54 and the VPD was 2.50 or 2.74 kPa. The K : Ca balance during the spring correlated negatively with the VPD, however, in the summer, the correlation was positive. In spring, the K : Ca optimum balance should be 0.78-0.82 when the PAR reaches a maximum of 102-142 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, while extreme levels of RFA (low: 9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and high: 289 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) should be accompanied by a reduction in the K : Ca balance; a similar trend was observed during the summer.

Key words: *ionic relations, cation balance, temperature, relative humidity.*

INTRODUCCIÓN

México es un país en desarrollo que ha tomado un papel preponderante como proveedor de productos hortícolas en el mercado internacional (Van der Broeck y Martens, 2016), siendo el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) la actividad agroindustrial más importante por sus implicaciones sociológicas debido a la gran escala de producción, así como por los ingresos económicos que genera (Barron y Rello, 2000). De acuerdo con SIAP (2017), México es el décimo país en producción de tomate y el primero en exportaciones a nivel mundial (Savedra, 2017). Para haber logrado esto, los productores de tomate en México debieron cumplir con altos estándares de calidad, sanidad e inocuidad.

La industria del tomate de invernadero ha ido creciendo fuertemente en México desde la entrada en vigor de tratados comerciales con Estados Unidos y Canadá en 1994, ya que permite un mejor control de parámetros ambientales y biológicos que se reflejan en mayor rendimiento y calidad de frutos.

El manejo de la nutrición mineral durante el desarrollo del cultivo es un factor clave que determina el rendimiento y la calidad (Fanasca *et al.*, 2006). En un sistema de producción de cultivos sin suelo debe considerar el adecuado manejo de la composición de la solución nutritiva (SN) (Villegas-Torres *et al.*, 2005), así como la relación mutua entre cationes y aniones, la concentración de los nutrientes, la conductividad eléctrica (CE), el pH, y la temperatura (Adams y Ho, 1995; Villegas-Torres *et al.*, 2005).

Debido a que la absorción de los macronutrientes no es lineal durante el desarrollo de la planta, esto demanda el ajuste de la relación mutua entre los iones de la SN para evitar desbalances nutrimentales, como es el caso del potasio (K) y el calcio (Ca) (Herrera, 1999; Schneider y Mollier, 2016). El K es el elemento que más demandan los frutos de tomate (Betancourt y Pierre, 2013) y está implicado en la calidad del mismo (Fanasca *et al.*, 2006). Una alta relación catiónica de K en la SN, con respecto a Ca, aumenta los atributos de calidad (Fanasca *et al.*, 2006) ya que plantas de tomate irrigadas con altas concentraciones de K, combinado con bajo Ca, resulta en frutos con mayor concentración de licopeno (Almeselmani *et al.*, 2009). El aporte adecuado de Ca

logra reducir el porcentaje de frutos afectados por pudrición apical, mismo que reduce la calidad comercial (Parra *et al.*, 2008). Paiva *et al.* (1998) reportaron que a medida que aumenta la concentración de Ca en la solución que rodea las raíces, la acumulación de K en el fruto disminuye. Por lo tanto, un aporte desbalanceado de K y Ca en la SN puede disminuir la calidad y rendimiento (Herrera, 1999), como se ha demostrado en tomate (Nukaya *et al.*, 1995).

El tomate es en México uno de los cultivos que más se produce en condiciones de sistemas de cultivo sin suelo, por lo que es de gran interés entender el efecto de las proporciones catiónicas entre K y Ca en la SN y su interacción para mejorar la calidad. Sin embargo, el cultivo de tomate en invernadero suele ser de un ciclo que se prolonga por diferentes estaciones del año, ocasionando que las plantas se enfrenten a diferentes condiciones climáticas. Tales condiciones, como alta o baja humedad relativa y temperatura, afectan la absorción de nutrimentos (Díaz *et al.*, 2007; Herrera, 1999; Suzuki *et al.*, 2015), por lo tanto, el óptimo balance K : Ca en la SN puede ser diferente de una estación a otra.

La radiación solar es la fuente principal de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las plantas utilizan una parte de la radiación solar para la fotosíntesis denominada “Radiación Fotosintéticamente Activa” (RFA) que va desde 400 hasta 700 nm (Mavi y Tupper, 2004). El crecimiento vegetal y la formación de frutos se relacionan con el aprovechamiento lumínico. Sin embargo, la intensidad lumínica presenta gran variabilidad durante el día y el año (Dussi, 2007).

El déficit de presión de vapor (DPV) (McAdam *et al.*, 2016), está directamente relacionado con transpiración, por lo tanto afecta la calidad y el rendimiento en tomate (Lu *et al.*, 2015; Du *et al.*, 2018). El DPV es capaz de reflejar con mayor precisión el estado de la planta teniendo en cuenta mediciones de temperatura y humedad Relativa (HR) (Zolnier *et al.*, 2000). Los informes también indican que la eficiencia del uso de la radiación de la planta está relacionada con DPV (Stockle y Kiniry, 1990).

Objetivo General

Determinar la relación óptima $K : Ca$ en la SN y el efecto de esta sobre el rendimiento y calidad en tomate en un sistema de cultivo sin suelo en dos etapas de fructificación: primavera y verano.

Objetivos Específicos

Determinar la relación entre el balance $K : Ca$ con el déficit de presión de vapor prevaeciente en primavera y en verano.

Determinar la relación entre el balance $K : Ca$ con la radiación fotosintéticamente activa prevaeciente en primavera y en verano.

Hipótesis

La relación $K : Ca$ afecta el rendimiento y cambia en función de la estación del año y el DVP.

REVISIÓN DE LITERATURA

Absorción catiónica

Los cationes ingresan a la raíz por medio de la membrana plasmática de las células endodérmicas de la raíz (transporte simplástico) o ingresando por el apoplasto de la raíz a través del espacio entre las células (transporte apoplástico). Traspasan las membranas con ayuda de proteínas transportadoras, éstas se producen naturalmente en varias membranas vegetales (tonoplasto, retículo endoplásmico, mitocondrias, cloroplastos) y existen múltiples proteínas transportadores para cada elemento (Pinto y Ferreira, 2015).

Los cationes monovalentes como el K tienen un papel crucial en el potencial osmótico de las células. Por el contrario, los cationes divalentes, como el Ca, suelen estar formando complejos con compuestos orgánicos dentro de las células y, por lo tanto, son responsables de otras tareas dentro de los tejidos de las plantas (Pinto y Ferreira, 2015).

Absorción y transporte de potasio

El K se absorbe en las plantas en forma de K (Favela *et al.*, 2006). La corteza de la raíz funciona como un sistema de recolección de agua y nutrientes absorbidos por la epidermis (Ahmad y Maathuis, 2014). La concentración de K en suelos está entre 0.1 y 1 mM y el K en el citoplasma es aproximadamente 100 mM. (Zörb *et al.*, 2014), por lo que ingresa a la célula de la raíz en contra de gradiente de concentración (Nieves-Cordones *et al.*, 2014).

Al menos dos sistemas de transporte están involucrados en la captación de K: un sistema de alta afinidad que opera a bajas concentraciones externas y un sistema de baja afinidad a concentraciones más altas (Nieves-Cordones *et al.*, 2014; Pinto y Ferreira, 2015). Los transportadores se agrupan en cuatro familias, incluidos HAK / KT / KUP (simportadores K/H), HKT / Trk (simportadores K / Na), CHX (antiportadores de catión / H) y Shaker (Nieves-Cordones *et al.*, 2014). El flujo de K de baja afinidad parece estar mediada por canales K de Shaker tales como AtAKT1 y AtKC1, que se expresan principalmente en células epidérmicas de raíz. Los canales Shaker de la planta muestran una extraordinaria selectividad de K.

En consecuencia, los canales Shaker K-143 ATAKT1 y ATKC1, así como el transportador HAK / KT / KUP ATHAK5 son responsables de casi todo el influjo K (Nieves-Cordones *et al.*, 2014). Los sistemas de transporte de K en los orgánulos vegetales actúan coordinadamente con los sistemas de transporte K intrínsecos de la membrana plasmática para mantener las concentraciones de K del citosol (Hamamoto y Uozumi, 2014).

La membrana plasmática juega un papel clave en los procesos de intercambio de K. Esta membrana actúa como barrera para la entrada de K en las células de la raíz pero, al mismo tiempo, previene la pérdida de K acumulado (Demidchik, 2014; Véry *et al.*, 2014). La membrana plasmática de las células vegetales se activa con la actividad de una H-ATPasa que, al consumir ATP, bombea H fuera de la célula. Por lo tanto, se crea un potencial que consiste en un gradiente de H (pH) (pH externo = 5.5, pH citoplasma = 7.3) y un gradiente eléctrico negativo en el interior. Este gradiente contribuye al transporte de K hacia el interior de las células en contra de un gradiente de concentración (Nieves-Cordones *et al.*, 2014; Véry *et al.*, 2014).

Después de la absorción, el transporte radial de agua y nutrientes sigue con el objetivo final de la entrar a la corriente del xilema radicular, tejido vascular que es parte de la estela de la raíz (Ahmad y Maathuis, 2014). El transporte radial puede seguir tanto la vía del apoplástica como la simplástica. El simplasto (Interior de las células que excluye las paredes), es la vía que consta de células que están conectadas mediante plasmodemos. El agua y los solutos absorbidos en el simplasto pueden moverse de la periferia a la parte central de la raíz (Gilliam *et al.*, 2011). Las paredes interconectadas de los diversos tejidos de la raíz forman un conducto altamente poroso llamado apoplasto a través del cual el agua y los solutos pueden moverse libremente (Ahmad y Maathuis, 2014). La administración a tejidos que no son de raíz requiere la carga de K en el xilema, un proceso controlado en gran medida por los canales de K que rectifican hacia afuera en las membranas de las células de parénquima adyacentes al xilema (Véry *et al.*, 2014).

El transporte de K en el floema se dirige desde los tejidos vegetales más antiguos a los más jóvenes, lo que asegura la redistribución de este ion hacia los tejidos en crecimiento, como hojas y frutos (Zörb *et al.*, 2014).

Los fotosintatos tales como azúcares y aminoácidos son transportados a través del floema hacia el desarrollo de flores, frutas en maduración, semillas y raíces (Marschner, 2012).

El K tiene una función importante en el transporte de soluto impulsado por flujo masivo en los tubos de tamiz del floema. Debido a la acumulación de K para establecer y mantener un alto potencial osmótico en los tubos cribosos permite una alta tasa de transporte (Marschner, 2012). La reasignación de K desde el brote hacia la raíz a través del floema y la posterior reposición al xilema ocurre en el caso de una administración de K que excede los requerimientos de brotes o bajo deficiencia de K (Zörb *et al.*, 2014).

La acumulación de aniones de ácidos orgánicos en los tejidos vegetales a menudo es la consecuencia de la importación de K sin un anión inorgánico acompañante en el citoplasma, por ejemplo, en células de raíz o guardia.

El papel de K en el equilibrio catión-anión también se refleja en el metabolismo de NO_3 , en el que K es a menudo el contra ión dominante para NO_3 en el transporte a larga distancia en el xilema y para el almacenamiento en vacuolas (Marschner, 2012; Baset, 2015)

Función del potasio en plantas

El K activa más de 50 sistemas enzimáticos, entre los que destacan oxidorreductasas, deshidrogenasas, transferasas, sintetasas y quinasas (Bonilla, 2008). La baja concentración de K foliar, mantiene la concentración K del citosol constante, pero, las concentraciones de K vacuolar disminuyen fuertemente. Sin embargo, con la deficiencia prolongada de K, las concentraciones de K citosólico también disminuyen la incapacidad de mantener el pH del citosol óptimo.

Entre las enzimas más sensibles a la privación de K se encuentran la piruvato quinasa (Armengaud *et al.*, 2009; Hawkesford *et al.*, 2012) enzima de la glucólisis que cataliza la transferencia de un grupo fosfato del fosfoenolpiruvato al adenosín difosfato (ADP), produciendo una molécula de piruvato y otra de adenosín

trifosfato (ATP) (Andrade *et al.*, 2007) y la fosfofructocinasa (Armengaud *et al.*, 2009; Hawkesford *et al.*, 2012), encargada de fosforilar a la fructosa 6-fosfato y catalizar la transferencia de un grupo fosfato desde el ATP a la fructosa 6-fosfato en la glucólisis para formar un derivado bisfosfato (Zago *et al.*, 2017).

El bajo suministro de K, ocasiona principalmente, la inhibición directa de la piruvato quinasa por la baja cantidad de K en el citoplasma de las células de la raíz. La actividad del almidón sintasa, es también altamente dependiente de K (Hawkesford *et al.*, 2012). La almidón sintasa cataliza la transferencia de glucosa a moléculas de almidón (Díaz, 2002). EL K activa ATPasas de bombeo de protones que facilitan el transporte de K desde la solución externa a las células de la raíz (Hawkesford *et al.*, 2012; Nieves-Cordones *et al.*, 2014).

El K es el elemento más importante en la extensión celular y la osmorregulación (Marschner, 2012). Las actividades enzimáticas en tejidos deficientes de K conducen a cambios típicos en el patrón de metabolitos, origina un aumento en hidratos de carbono solubles, particularmente azúcares reductores aminoácidos ricos en N y positivamente cargados (Zörb *et al.*, 2014), Mientras que las concentraciones del nitrato, los ácidos orgánicos, los aminoácidos cargados negativamente y el piruvato disminuyen (Armengaud *et al.*, 2009).

No tiene un papel estructural, sin embargo, resulta necesario en la síntesis de proteínas (Díaz *et al.*, 2007). En el sistema estomático el papel principal del K es el de mantener la turgencia de las células y la apertura y cierre de estomas en las células guarda (Bonilla, 2008). También está involucrado en la regulación de ósmosis. Los iones de potasio actúan directamente como solutos, cambiando el potencial osmótico en los compartimentos y por lo tanto la turgencia, y como portador de cargas, también el potencial de membrana (Hawkesford *et al.*, 2012). La deficiencia de potasio en hojas raramente produce acumulación de almidón, pero la acumulación de azúcares sí se observa a menudo (Zörb *et al.*, 2014).

La acumulación de azúcares en hojas maduras es consecuencia de la exportación inhibida de las hojas y una menor demanda por órganos receptores como las hojas en crecimiento (Gerardeaux *et al.*, 2010) y frutas carnosas como el tomate (Kanai *et al.*, 2007).

En plantas con deficiencia de K se incrementa la concentración de sacarosa, crecimiento lento de la raíz, las raíces con deficiencia de K no muestran una acumulación de azúcares, esto es concentraciones bajas de sacarosa y almidón que raíces sin deficiencia (Kanai *et al.*, 2007). Una razón para esto es que la exportación de sacarosa a la raíz se reduce en plantas con deficiencia de K, lo que puede atribuirse a un requerimiento de K con sacarosa en la carga de floema (Zörb *et al.*, 2014).

Absorción y transporte de Calcio

El calcio se absorbe como ion divalente (Baset, 2015; Díaz, 2002), de forma simplificada a través de canales de cationes no selectivos (Karley y White, 2009). Estos canales pueden dividirse según su dependencia del voltaje, activados por despolarización (DA-NSCC), activados por hiperpolarización (HA-NSCC) e insensibles al voltaje (VI-NSCC (Demidchik y Maathuis, 2007). Existe un gradiente electroquímico para el Ca en las raíces de las plantas ya que los niveles de Ca citosólico están en el rango μM , mientras que las concentraciones de Ca en la solución del suelo están en el rango mM (Karley y White, 2009). Una vez dentro de las células de la raíz, los cationes divalentes, como el Ca, suelen estar formando complejos con compuestos orgánicos dentro de las células y tejidos de las plantas (Pinto y Ferreira, 2015).

Cambios en el flujo del xilema que afectan la movilidad del Ca pueden incluir; barreras físicas (es decir, porosidad de la membrana, diámetro del vaso del xilema), cambios estructurales (formación de geles de pectina dentro del xilema) y permeabilidad celular al agua (cambios de expresión temporal y espacial de las acuaporinas) (Hocking *et al.*, 2016).

La regulación del transporte de Ca a través de la membrana plasmática y las membranas de los órganos está estrechamente controlada por el patrón de expresión, la interacción y el control postranscripcional de muchos transportadores de Ca (Hocking *et al.*, 2016; Gilliam *et al.*, 2011). En *Arabidopsis*, la desactivación de los antiportadores de Ca/H vacuolar AtCAX1 y AtCAX3 produjo reducción de la abertura estomática, la conductancia estomática

y la asimilación de CO₂ hasta la reducción de la extensión de la pared celular (Hocking *et al.*, 2016).

La nutrición del calcio en los frutos depende de las vías físicas y moleculares del suministro de agua y Ca. Se ha demostrado que la acumulación de calcio en la fruta del tomate depende de las tasas de flujo de savia del xilema, influenciadas por la transpiración y las tasas de crecimiento (Hocking *et al.*, 2016). Aunque se han investigado algunos mecanismos de transporte de calcio en la fruta, la señalización del calcio en la fruta no se ha hecho, por lo que el impacto más amplio de la nutrición, el transporte y las vías de señalización del calcio en el desarrollo y la maduración de la fruta aún se desconoce.

Según Hocking *et al.* (2016), los factores que influyen en la distribución de calcio en tejidos aéreos incluyen:

- La tasa de flujo másico de agua de xilema (el Ca tiene poco movimiento en el floema).
- La competencia entre iones por sitios de unión en paredes de vasos de xilema y membranas (incluyendo H).
- La formación de complejos poco solubles o insolubles (p. ej., oxalato cálcico) y mecanismos celulares de transporte agua/iónico.

En la raíz, los cationes pueden almacenarse en la vacuola y/o pared celular (Marschner, 2012). Se ha considerado a la vacuola como el sitio de almacenamiento principal para los cationes de Ca en las células de la planta y la compartimentación vacuolar de los elementos también forma parte del mecanismo de tolerancia (Hirschi, 2004).

Función del calcio en plantas

El Ca, como catión divalente, estabiliza las membranas mediante interacciones con las cabezas de fosfolípidos cargados negativamente, que influye en la función de la membrana (Hawkesford *et al.*, 2012). Y fortalece la pared celular (Hocking *et al.*, 2016). En las raíces la presencia de Ca resulta crítica para su elongación celular (Díaz *et al.*, 2007). El Ca es importante y se localiza en la pared celular (Baset, 2015), y adherido a pectinas. En el apoplasto, una parte del Ca está firmemente unida a las estructuras, mientras que otra parte es

intercambiable en las paredes celulares y en la superficie exterior de la membrana plasmática (Díaz *et al.*, 2007; Hawkesford *et al.*, 2012).

El Ca es un mensajero importante en la apertura estomática, lo que regula la entrada de CO₂ (para la fotosíntesis) y salida de agua debido a la transpiración de las plantas (Reyes *et al.*, 2013). Además, puede inactivar enzimas a muy bajas concentraciones, como la enzima citosólica fructosa-1,6-bisfosfatasa que regula la síntesis de sacarosa a partir de triosa fosfatos administrados por los cloroplastos. Tan solo 1 µM de Ca inhibe severamente su actividad (Gilliam *et al.*, 2011).

Interacción Potasio-Calcio

La combinación de diferentes factores ambientales y nutricionales pueden desencadenar con frecuencia distintos desordenes fisiológicos que afectan la producción y calidad de tomate. Como la pudrición apical (Arellano-Gil y Gutiérrez- Coronado, 2006), el rajado de fruto (Parra-coronado y Miranda, 2016), el bufado (Fruta con una porción hueca entre la pared exterior y los lóculos y pocas semillas) y payaseado (coloración roja con hombres verdes) (Martínez *et al.*, 2012). El Ca se ve implicado en los dos primeros desordenes, mientras que el K en los últimos tres (Parra-coronado y Miranda, 2016).

La absorción intensa de K reduce la absorción de Ca en la planta (Baset, 2015). La concentración de Ca en la rizosfera influye en la selectividad de la captación de iones y en la acumulación relativa de K y Na en particular (Hawkesford *et al.*, 2012). En especies de maíz "natrofóbico" y la remolacha azucarera "natrófila", la ausencia de Ca, incrementa la absorción de Na sobre la absorción de K, pero con la presencia de Ca en la solución de la rizosfera cambia la relación de absorción a favor de K a expensas de Na (Hawkesford *et al.*, 2012).

La capacidad de la planta para acumular biomasa en sus órganos y especialmente en los frutos depende de la concentración de K en la solución nutritiva. El K no entra en la composición de elementos estructurales, pero sí juega un papel importante en el transporte de azúcares (Hernández *et al.*, 2014). Se ha comprobado que el flujo de carbohidratos en el floema es más intenso en las plantas que recibieron una adecuada fertilización con K y que la eficiencia en

la absorción de K así como la habilidad de la planta de tomate para concentrar este elemento en la corriente xilemática tienen una relación positiva con el crecimiento aéreo (Hernández *et al.*, 2014).

Calidad de tomate

La conductividad eléctrica (CE) alta (3.5-9.0 dS cm⁻¹) pueden mejorar la calidad de los frutos de tomate. Sin embargo salinidades superiores a 2.3-5.1 dS cm⁻¹ resultan en una reducción indeseable del rendimiento (Rubio *et al.*, 2009). La alta CE puede disminuir el rendimiento, pero puede mejorar características organolépticas como pH, vitamina c, licopeno y actividad antioxidante (Iglesias *et al.*, 2015).

En el tomate el contenido de potasio suele asociarse a la calidad de sus frutos (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002). El tomate se consume rojo debido a que su máxima calidad organoléptica, se presenta cuando el fruto ha alcanzado por completo el color rojo, pero antes de un ablandamiento excesivo, por lo tanto el color del fruto es la característica externa que determina el estado de madurez (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2008). El tratamiento de frutos con aspersiones que contienen calcio es una práctica hortícola de rutina, que puede mejorar la integridad celular y la resistencia a enfermedades (Hocking *et al.*, 2016; Pérez y Quintero, 2015).

Reyes *et al.* (2013) menciona que frutos con bajo nivel de Ca tiene mayor incidencia de desórdenes fisiológicos, maduración más acelerada, pérdida brusca de firmeza en postcosecha y menor resistencia al transporte y manipulación (Pérez y Quintero, 2015). Además frutos deficientes en Ca presentan tejidos suaves (Reyes *et al.*, 2013; Hao y Papadopoulos, 2003)

Factores ambientales y su relación con el desarrollo del cultivo

Entre los factores ambientales que afectan la absorción nutrimental en plantas, podemos mencionar la temperatura, humedad relativa (HR), y alta luminosidad (Adams y Ho, 1993). Además, la intensidad y la calidad de la radiación (balance espectral) en invernadero modifican la temperatura interna del mismo y las respuestas morfológicas y fisiológicas de las plantas (Favela *et al.*, 2006).

Humedad relativa

Para la mayoría de las variedades de tomate de invernadero, el rango de humedad relativa entre 60-90% se considera apropiado según los estándares ASABE (2008). Además, se sugiere que el rango óptimo de humedad relativa durante todas las etapas de crecimiento del tomate es entre 50-70%.

Liu *et al.* (2006) observaron que la HR entre 55 y 90%, (correspondiente a DPV de 0.2 y 1 kPa) no tiene ningún efecto negativo en la fotosíntesis. Por el contrario, demasiada HR puede detener la transpiración y puede provocar pérdidas de turgencia en las plantas.

Se han realizado investigaciones sobre el efecto de la humedad sobre la absorción de nutrientes, el crecimiento de las plantas y el rendimiento de la fruta del tomate (Adams y Ho, 1993; Barker, 1990). El efecto de la humedad se examina de dos maneras: efecto adaptativo a largo plazo y efecto instantáneo. El primero se realiza en el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los frutos de los cultivos bajo invernadero, mientras que el último se ha examinado en la fotosíntesis y en los estomas (Xu *et al.*, 2006). Una alta humedad relativa reduce el área foliar de las plantas de tomate, así como el rendimiento y la calidad del fruto, esto debido al bajo contenido de Ca, (Holder y Cockshull, 1990; Jolliet y Bailey, 1992). Además, también afecta la absorción de otros elementos como K y Mg (Gislerød y Adams, 1983). Contrario a lo reportado por Barker (1990), quien menciona que una baja humedad relativa reduce ligeramente el rendimiento en la fase inicial, pero aumenta el rendimiento total de todo el período de producción. En invernadero, la alta humedad restringe la transpiración y las plantas se calientan mucho debido a la baja transpiración y la falta de enfriamiento de las hojas en un día soleado y caluroso. Cuando se reduce la transpiración, la absorción de agua es baja y, por lo tanto, se restringe el transporte de nutrientes desde las raíces hasta los brotes, especialmente la escasez de calcio es muy común en esas condiciones (Zhang *et al.*, 2015).

Xu *et al.*, (2006), mostraron que las plantas cultivadas con baja humedad del aire (DPV alta) tuvieron una mayor capacidad fotosintética y mayores actividades relacionadas con la fotosíntesis que las plantas cultivadas bajo alta humedad

(DPV baja). Esto debido a que la alta transpiración causada por la baja humedad mejora la translocación de Ca hacia las hojas jóvenes superiores y aumenta la absorción de minerales como Mg y K. Estos minerales son importantes para los procesos fotosintéticos y el crecimiento de las plantas. Es por eso que muchos estudios han encontrado que la transpiración es proporcional al crecimiento y el rendimiento en muchos cultivos (Garrity *et al.*, 1982; Lawn, 1982).

Radiación

La producción de los cultivos es producto del aprovechamiento de la radiación solar y su conversión en biomasa. La radiación solar es la fuente principal de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Éstas perciben la radiación solar en tres diferentes formas: intensidad lumínica, calidad de luz y horas luz por día (fotoperiodo) (Mavi y Tupper, 2004). La parte de la radiación solar que es útil para la fotosíntesis de las plantas es designada como “Radiación Fotosintéticamente Activa” o PAR que va desde 400 hasta 700 nm, situada entre la radiación ultravioleta (UV) y la infrarroja (IR).

El crecimiento de la planta y la formación de frutos tienen una estrecha relación con el aprovechamiento lumínico. Sin embargo, la intensidad lumínica presenta gran variabilidad durante el día y el año (Dussi, 2007). Wang (2006) menciona que la intensidad lumínica y la temperatura, afectan el contenido de los fitonutrientes en los frutos. De este modo, una radiación solar óptima favorece el color al permitir una síntesis mayor de pigmentos rojos; mejora el índice refractométrico (grados Brix) y aumenta el contenido de materia seca.

En tomates, una radiación solar directa puede causar el sobrecalentamiento de los frutos y generar así el rajado de frutos, debido al efecto adicional de incremento de la temperatura en las capas de las células insoladas (Fischer y Orduz-Rodríguez, 2012; Helyes *et al.*, 2007).

También la planta, en general, muestra marchitamiento y desecación debido al aumento de la transpiración en los tejidos afectados y necrosis de las hojas y brotes (Kays, 1991).

Por otro lado, una baja intensidad lumínica reduce la fotosíntesis neta, implicando mayor competencia por los fotoasimilados lo que afecta el desarrollo y la producción de la planta (Nuez, 1995). Además, una radiación solar baja provoca alargamiento de los entrenudos, tallos más delgados, hojas anchas y finas y escaso desarrollo del sistema radical (Coletto, 1995). En casos de extremada reducción de la intensidad lumínica o oscuridad, las plantas reaccionan con una etiolación (deficiencia de cloroplastos) y un crecimiento muy alargado (Rajendran *et al.*, 2009). Una iluminación insuficiente en tomates, especialmente bajo invernadero, puede provocar la caída de la flor y una deficiente polinización y cuajamiento, especialmente, cuando las temperaturas son bajas (Nuez, 1995).

Temperatura

La temperatura afecta la actividad metabólica celular, la absorción de agua y nutrientes, el intercambio gaseoso, la producción y gasto de carbohidratos y reguladores del crecimiento, entre otros. Durante el verano, un problema que enfrentan los productores que utilizan invernaderos son las elevadas temperaturas, las cuales disminuyen la calidad de hortalizas y flores, y causan quemaduras en plántulas (Cruz *et al.*, 2002). La temperatura es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Una temperatura superior o inferior a los valores óptimos afecta a las diferentes fases de crecimiento y desarrollo del tomate, así como a la apariencia y calidad general de la fruta (Van Ploegand Heuvelink, 2005). Al respecto, Jones *et al.* (1999) indica que el cultivo de tomate se desarrolla dentro de un rango de temperaturas entre 10 y 35 °C y que temperaturas inferiores a este rango, inhiben su desarrollo vegetativo, reducen la polinización y no permiten una maduración uniforme de los frutos; señala también, que temperaturas superiores a los 35 °C, reducen el amarre del fruto e inhiben el desarrollo normal del color de las frutas. Las plantas de tomate son notablemente sensibles a las temperaturas de aire superiores a las óptimas durante la etapa reproductiva y pueden enfrentar una reducción en el porcentaje de la producción de fruta. Las altas temperaturas

causan abortos frutales y hojas flácidas debido a una transpiración inadecuada, e incluso pueden destruir la planta. (Harel *et al.*, 2014; Shamshiri *et al.*, 2018).

Déficit de presión de vapor

La humedad atmosférica es expresada como déficit de presión de vapor (DPV) (McAdam *et al.*, 2016), la cual se define como la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real a una temperatura y humedad relativa conocidas y está directamente relacionada con la transpiración, por lo que afecta la calidad y el rendimiento de los frutos de tomate. (Lu *et al.*, 2015; Du *et al.*, 2018). Durante el invierno Lu *et al.* (2015) encontraron que mantener una DPV más baja al mediodía incremento el índice estomatal de la hoja de tomate y la conductancia estomática durante la mayor parte del día, lo que condujo a un aumento en la tasa fotosintética neta.

Desde una perspectiva de la física, el transporte de agua en la relación suelo-planta-atmósfera es un proceso pasivo impulsado por gradientes de energía libre. La fuerza motriz para el movimiento del agua se determina por el gradiente de potencial de agua en fase líquida (desde el suelo a las hojas) y la diferencia en déficit de presión de vapor (DPV) a lo largo de la fase de gas (de la hoja interna a la atmósfera) (Fricke *et al.*, 2016). Por lo tanto, el estado del agua de la planta está determinado por la humedad del suelo y la DPV y el ajuste de las plantas a la deshidratación (de Boer *et al.* 2011).

En condiciones naturales, la humedad del suelo varía mucho menos que el flujo de la hoja y la atmósfera, que fluctúa en respuesta a una alta frecuencia de DPV atmosférica (Caldeira *et al.*, 2014). Se ha demostrado que la regulación de la DPV mantiene simultáneamente los intervalos óptimos de temperatura y humedad relativa y por lo tanto mejora la fotosíntesis de la planta y la productividad en cultivos de invernadero (Zhang *et al.*, 2015). Por otro lado (Zhang *et al.*, 2017) mencionan que el DPV bajo puede disminuir sustancialmente la fuerza impulsora de agua en plantas de tomate desarrolladas en condiciones de bajo DPV., lo que en consecuencia disminuye la tasa de pérdida de agua y el estrés hídrico moderado. Genera alivio del estrés hídrico al reducir la función

estomática sostenida de DPV y la fotosíntesis, con mejoras en la producción de biomasa y fruta.

Zolnier *et al.* (2000), mencionan que el DPV es capaz de reflejar con mayor precisión cómo se siente la planta teniendo en cuenta tanto las mediciones de temperatura como de HR. Otra aplicación importante de la estimación de DPV es evaluar el potencial de condensación de un cultivo de invernadero e identificar cuándo es probable que suceda. Los informes también indican que la eficiencia del uso de la radiación de la planta está relacionada con DPV (Stockle y Kiniry, 1990).

Los valores óptimos de DPV varían en un rango de 0,2 a 1,0 kPa en diferentes fuentes. Por ejemplo, Barker (1990) informa que los valores de DPV entre 0.5 y 0.8 kPa son óptimos para la mayoría de los cultivos de invernadero, ya que evitan la reducción del rendimiento y enfermedades fúngicas. Iraqi *et al.* (1995) sugirieron un DPV de 0,8 kPa como el óptimo durante las horas diurnas y nocturnas, e informaron que tanto la tasa fotosintética como el rendimiento de las frutas de tomate aumentan comparado con un DPV de 0,5 kPa.

Por otro lado, Janse y Welles (1984) observaron que las frutas que crecen con un DPV bajo generalmente se ablandan más rápidamente y tienen menos calidad y vida útil más corta. Además, Gautier *et al.* (2001) mencionan que un DPV óptimo mejora la calidad de la fruta del tomate (mayor contenido de azúcar y peso de la materia seca) bajo baja carga de fruta, mientras que Barker (1990) informó que los problemas asociados con la deficiencia de calcio pueden evitarse manteniendo un DPV óptimo. Valores bajos de DPV (por debajo de 0.3 kPa) en las plantas de tomate causan deficiencias minerales, gutación, enfermedades fúngicas, hojas y tallos más grandes y gruesos, y debilitan el sistema de raíces como resultado de los esfuerzos para compensar la transpiración restringida, mientras que los altos niveles de DPV (mayores de 1.5 kPa) producen marchitez, plantas atrofiadas y hojas crujientes (Gautier *et al.*, 2001; Shamshiri *et al.*, 2018). En general, los diferentes factores ambientales no son constantes durante todo un ciclo productivo, ya que pueden variar desde cuatro hasta 12 meses, en conjunto con la demanda de nutrimentos de las plantas que dependen del estado

fenológico de la misma, los cuales requieren cambiar de una etapa a otra se planteó investigar el efecto de diferentes balances K : Ca en tomate bola variedad Clermon llevado a 10 racimos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló en un invernadero de tecnología media ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México. Se utilizaron semillas de tomate bola en racimo e indeterminado, variedad Clermon. El trasplante se efectuó el 28 de abril de 2016 en contenedores de polietileno negro, los cuales se llenaron con 10 L de una mezcla de turba ácida (Sphagnum moss, PREMIERE, Canadá) y perlita (Hortiperl, Termolita Monterrey, México) en proporción de 70:30% (v/v). Las plantas se establecieron en hileras dobles con una distancia de 1.2 m de centro a centro y a una distancia de 0.4 m entre planta y planta.

La cosecha de frutos se realizó en dos estaciones del año, verano (del 26 de junio al 15 agosto del 2016) y otoño (del 16 de agosto al 25 de octubre del 2016). Se hizo aclareo a 5 frutos por racimo en todas las plantas y la cosecha inició a los 88 días después del trasplante. En ambas estaciones del año se evaluaron los efectos de los balances K : Ca en la solución nutritiva (SN) (0.54, 0.64, 0.78, y 0.82) (Cuadro 1). Se consideraron las propiedades químicas del agua de riego para elaborar las SN y se ajustó el pH en un rango de 5.5 a 6.0.

Las SN Se aplicaron mediante un sistema de riego por goteo con gasto de 4 L h⁻¹ por planta. Los frutos de los racimos 1 al 5 comprendieron a los producidos durante la primavera mientras que los del racimo 6 al 10 a los producidos durante el verano. En el momento que las plantas de primavera se irrigaron con las SN, las plantas para el verano recibieron una SN con la fórmula de Steiner. Al presentar un diámetro de una pulgada en frutos del sexto racimo, correspondientes a frutos de verano, se dejó de aplicar la solución Steiner y se cambió por las SN con su respectivo balance K : Ca. Los riegos se efectuaron de acuerdo a las necesidades del cultivo aplicando un volumen de solución para mantener un 25 % de drenaje.

Se registró el rendimiento por racimo y el rendimiento total acumulado se calculó con la suma de los 5 racimos de ambas estaciones. Se realizó un muestreo en el racimo 5 y en el racimo 10, considerando un tamaño uniforme y color rojo, para

determinar el contenido de sólidos solubles, firmeza y parámetros de color L, a y b.

Cuadro 1. Concentración de macronutrientes en soluciones nutritivas y balance K : Ca aplicadas en dos estaciones del año: primavera y verano.

Balance	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Conductividad eléctrica
K : Ca	meq L ⁻¹						dS m ⁻¹
0.54	14	2	8	7	4	13	2.4
0.64	14	2	8	7	4	11	2.4
0.78	12	1	7	7	4	9	2.0
0.82	14	2	8	9	4	11	2.4

Al término de cada estación se midió la altura de las plantas desde la base del tallo hasta la parte apical, mientras que el peso fresco y seco hojas, tallos y raíz se determinaron con una balanza digital marca RHINO. El material vegetal se deshidrató a 70 ° C en estufa de secado. El rendimiento de fruto se determinó en cinco racimos por cada una de las dos estaciones. En frutos se determinó los parámetros de color L, a y b mediante el software Tomato Analyzer versión 1.2. La firmeza de fruto se determinó con un penetrómetro (FT 327, McCormick®) utilizando una puntilla de 8 mm de diámetro.

Los datos climáticos prevalecientes en ambas estaciones del año se registraron mediante un Data Logger (Watch Dog series) (Figuras 1 a 4); con los registros de temperatura y humedad relativa se calculó el déficit de presión de vapor (DPV) considerando este la diferencia entre la humedad absoluta a saturación a una temperatura máxima determinada y la humedad absoluta real a esa temperatura.

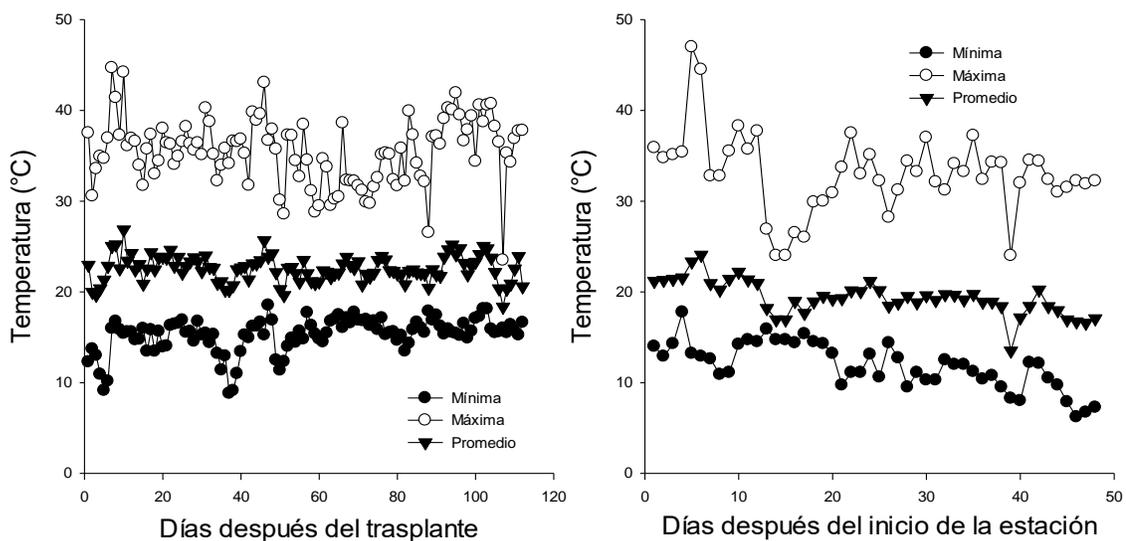


Figura 1. Temperatura mínima, máxima y promedio registrada en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y del sexto al décimo racimo en la estación de verano (derecha).

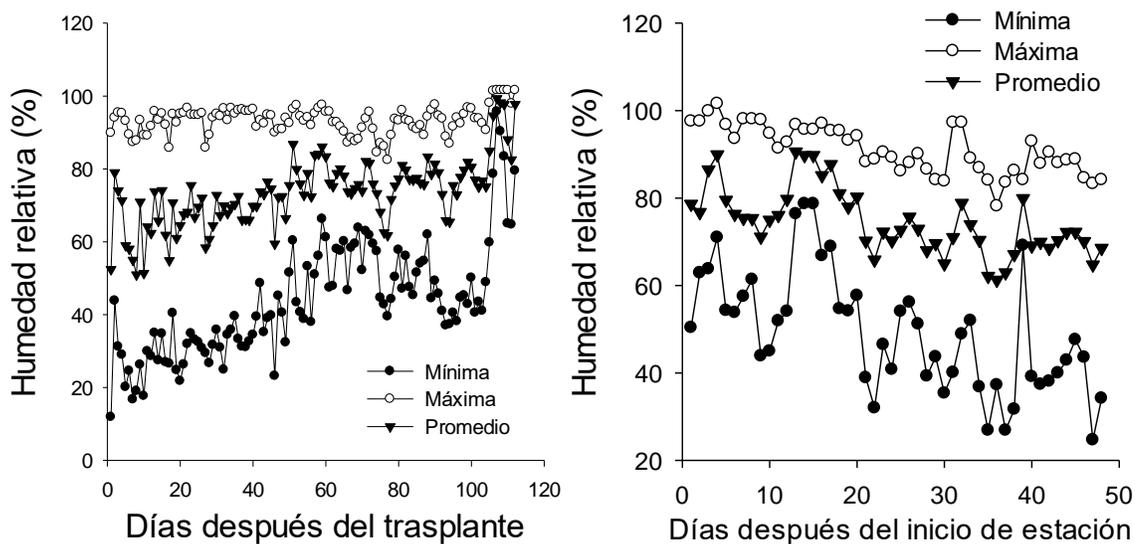


Figura 2. Humedad relativa mínima, máxima y promedio registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y del sexto al décimo racimo en la estación de verano (derecha).

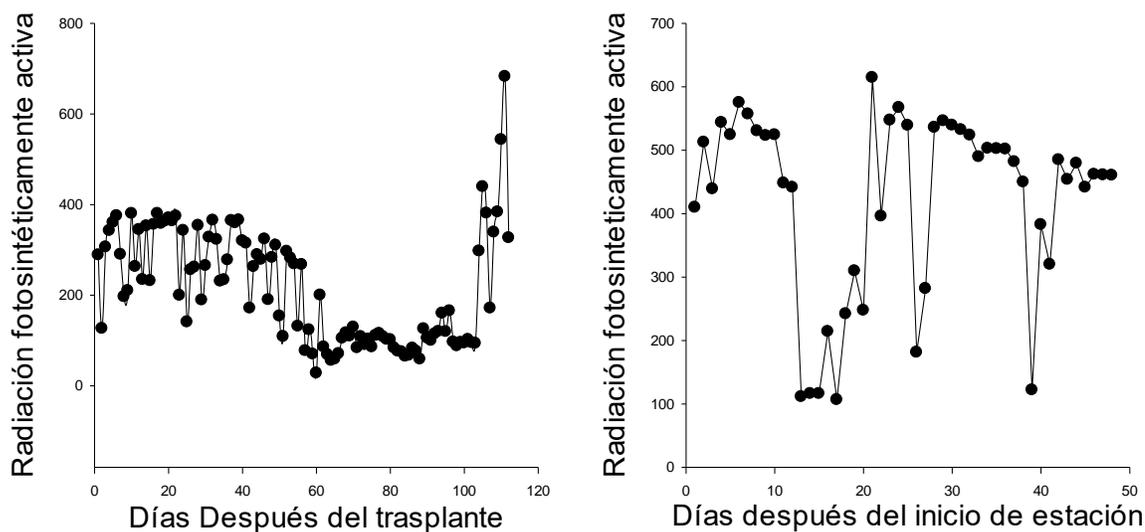


Figura 3. Radiación fotosintéticamente activa promedio registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y verano (derecha).

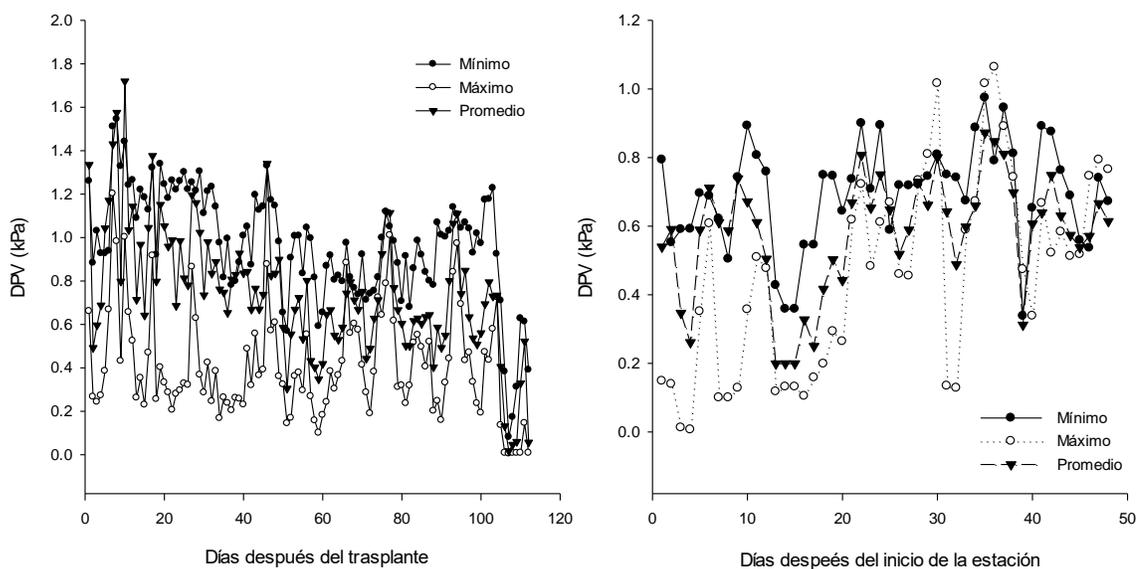


Figura 4. Déficit de presión de vapor (DPV) calculado a partir de temperatura y humedad relativa registradas en el invernadero durante el desarrollo de los frutos del primer a quinto racimo en la estación de primavera (izquierda) y racimo sexto al décimo en verano (derecha).

Cada uno de los balances K : Ca contó con cuatro repeticiones constituidas por dos plantas por repetición. El diseño experimental fue en bloques completos al azar y el análisis de datos se realizó mediante el software SAS versión 9.1 para correr un ANVA; en casos de significancia se aplicó prueba de medias por método de Duncan ($p < 0.05$). Se relacionó el rendimiento de fruto por racimos de cada uno de los balances K : Ca contra el déficit de presión de vapor (DPV) y la radiación fotosintéticamente activa (RFA) prevalecientes dentro del invernadero en cada una de las dos estaciones del año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento y calidad de frutos

En la cosecha de primavera, el balance K : Ca afectó el rendimiento acumulado del primero al quinto racimo (Cuadro 2), siendo las plantas tratadas con el balance de 0.64 las que obtuvieron la mayor producción de fruto. En contraste, durante el verano, el rendimiento acumulado del sexto al décimo racimo no fue afectado significativamente (Cuadro 3).

Cuadro 2. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva aplicada durante el desarrollo y cosecha del primero al quinto racimo de frutos de tomate durante la estación de primavera.

Balance K : Ca	Rendimi- ento total	Altura de planta	Peso fresco de raíz	Peso fresco de tallo	Peso fresco de hojas	Peso fresco total
	Kg	cm	-----g-----			
0.54	3.58b [†]	182	31.2	559ab	1443	2034ab
0.64	3.88a	179	49.5	578a	1612	2239a
0.78	3.37b	187	32.4	505bc	1197	1735b
0.82	3.62b	183	40.3	488c	1192	1719b
ANOVA	P < 0.01	P = 0.72	P = 0.16	P < 0.02	P = 0.07	P < 0.04

[†]Medias con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferente de acuerdo a la prueba Duncan con $p \leq 0.05$.

Cuadro 3. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva aplicada durante el desarrollo y cosecha del sexto al décimo racimo de frutos de tomate durante la estación de verano.

Balance K : Ca	Rendimi- ento total	Altura de planta	Peso fresco de raíz	Peso fresco de tallo	Peso fresco de hojas	Peso fresco total
	Kg	cm	-----g-----			
0.54	2.77	295	40.1	540	1686	2266
0.64	2.51	279	46.4	519	1551	2117
0.78	2.86	286	38.1	562	1598	2198
0.82	2.78	283	42.2	529	1733	2304
ANOVA	P = 0.32	P = 0.40	P = 0.39	P = 0.76	P = 0.67	P = 0.77

A pesar de no afectarse el rendimiento total acumulado durante la estación del año, el rendimiento de cada racimo considerado individualmente si fue afectado por el balance K : Ca tanto en la primavera como en el verano. En primavera, el balance que permitió la mayor producción de fruto fue el de 0.64 para el cuarto y quinto racimo, mientras que el segundo racimo mostró mayor producción con un balance de 0.78 (Figura 5). En cuanto a las cosechas realizadas en verano, el rendimiento fue mayor en el sexto, séptimo y noveno racimos cuando el balance K : Ca fue de 0.54, 0.78 y 0.78, respectivamente, mientras que en el octavo racimo el rendimiento solo fue afectado negativamente con el balance fue 0.64 (Figura 6).

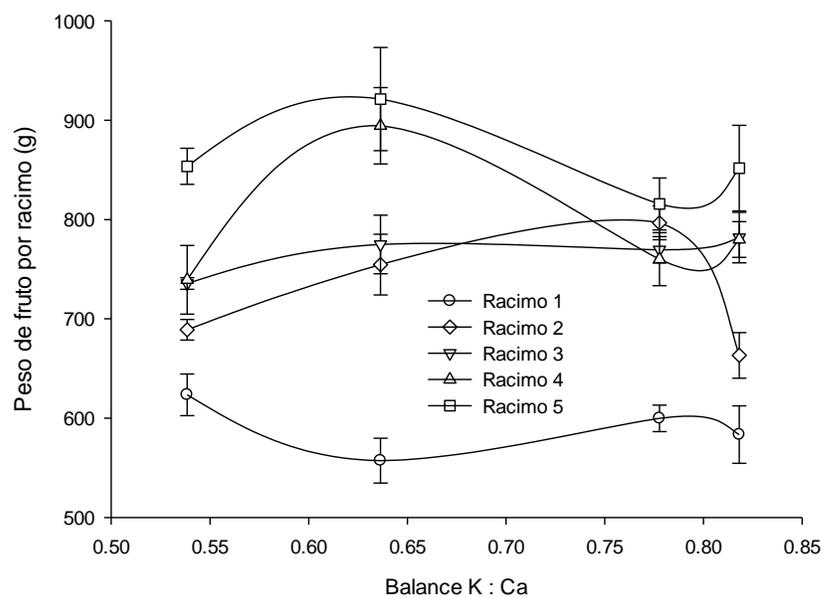


Figura 5. Efecto de balance K : Ca de la solución nutritiva sobre el rendimiento del primero al quinto racimo de frutos de tomate desarrollados y cosechados durante la primavera.

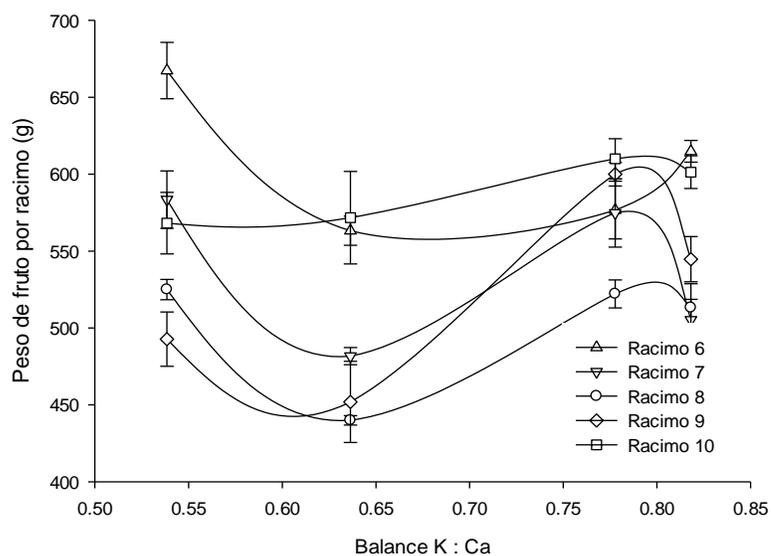


Figura 6. Efecto de balance K : Ca de la solución nutritiva sobre el rendimiento del sexto al décimo racimo de frutos de tomate desarrollados y cosechados durante el verano.

Lo anterior sugiere que las condiciones ambientales prevalecientes durante el desarrollo de cada uno de los racimos afectaron la producción de fruto del mismo. Por ejemplo, se ha reportado que la polinización es sensible a temperaturas altas, como se presentó en la primavera (Figura 1), por lo que la producción de fruto se vería afectada (Hatfield y Prueger, 2015); asimismo, se ha reportado que un aumento del 50% al 75% en la HR incrementa la viabilidad del polen (Harel *et al.*, 2014), lo que favorece la producción de frutos. Se ha señalado que un incremento de 2.5 °C por encima de la temperatura óptima para tomate de 25° C es suficiente para reducir la producción hasta en un 40% (Harel *et al.*, 2014).

En el presente estudio, el DPV calculado con los datos de HR y temperatura prevalecientes durante el desarrollo de los frutos en el respectivo racimo, tuvo una relación directa con el rendimiento; en la Figura 7 se observa que durante la primavera, el rendimiento de fruto en cada uno de los cinco racimos estuvo influenciado por el balance K : Ca así como por el DPV. Los racimos tuvieron una mayor producción de fruto cuando el balance K : Ca fue de 0.64 y el DPV fue de 2.81 kPa. En contraste, durante el verano, el rendimiento más alto se obtuvo en frutos de plantas tratadas con un balance de 0.54 y el DPV fue 2.50 o 2.74 kPa.

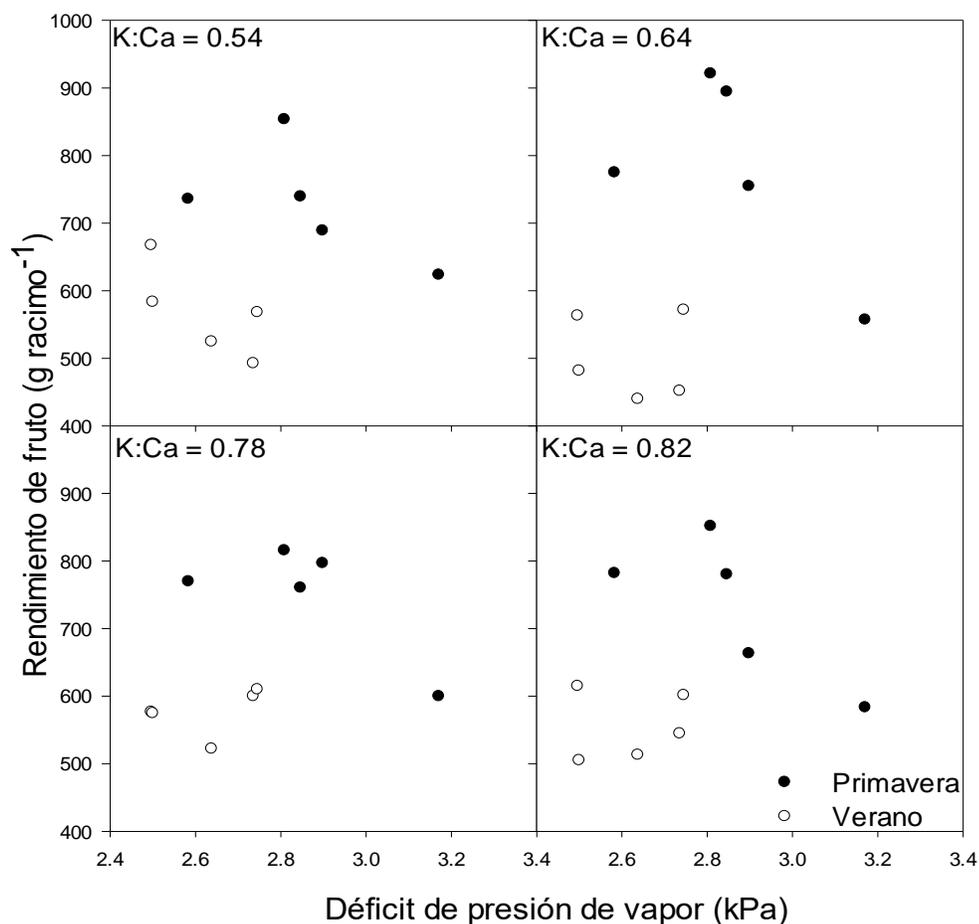


Figura 7. Efecto de Déficit de Presión de Vapor en dos estaciones del año sobre el rendimiento de fruto de tomate en función del balance K : Ca en la solución nutritiva.

El hecho de que en primavera se requiera de un balance K : Ca más alto (K : Ca=0.64) que en verano (K : Ca=0.54) implica que en el primer caso las plantas demandan menos Ca (Tabla 1) mientras que lo opuesto ocurre en verano, donde hay mayor demanda de Ca (Tabla 1). A su vez, el balance más alto en primavera puede estar relacionado con la demanda evaporativa por parte de las plantas ya que el DPV óptimo fue más elevado en primavera que en el verano. Se ha reportado que la tasa de acumulación de Ca se encuentra estrechamente ligada a la transpiración (Airman y Houter, 1990), y esta última al DPV.

Un mayor DPV implica que el aire del invernadero esta menos saturado de humedad, y por lo tanto la tasa de transpiración puede ser más elevada, permitiendo así un mayor transporte y movilización el Ca a través del xilema a pesar de estar en menor proporción en relación al K (Hawkesford *et al.*, 2012). Por el contrario, en el verano, el DPV óptimo fue más bajo que en primavera, lo que implica que el aire se encuentra más saturado de humedad, lo que en términos relativos se favorece una tasa de transpiración más baja, obligando de esta manera a elevar la proporción de Ca en la solución nutritiva pues este se translocaría también a una menor velocidad. Estos resultados están en concordancia con lo reportado por del Amor y Marcelis (2006), quienes señalan que una alta HR reduce la concentración de Ca en las partes vegetativas de plantas de tomate. Leonardi *et al.* (2000) reportaron que en condiciones de un alto DPV (2.2 kPa) se redujo el peso fresco de frutos, pero con un incremento en los sólidos solubles en comparación con plantas crecidas en ambientes con un menor DPV (1.6 kPa), lo cual no está en concordancia con nuestros resultados pues el rendimiento de frutos fue más bajo en verano, con un menor DPV, que en primavera, con un mayor DPV.

La Figura 8 muestra que el balance K : Ca que permitió el rendimiento más alto en cada uno de los cinco racimos desarrollados durante la primavera estuvo correlacionado negativamente con el DPV. En contraste, la correlación entre el balance K : Ca óptimo durante el verano fue positiva. Esta información sugiere que una estrategia para contrarrestar el efecto negativo de las condiciones ambientales del invernadero prevaletientes durante una determinada estación del año es el ajuste del balance K : Ca de las soluciones nutritivas en función del DPV y de la estación del año, pues mientras que en primavera se recomienda un menor balance K : Ca bajo condiciones de un alto DPV, en verano un alto DPV debe ir acompañado de un balance K : Ca más elevado.

La diferencia en la respuesta al DPV entre ambas estaciones puede ser debido a la interacción con la RFA, ya que esta también tuvo un efecto definido sobre el balance K : Ca que produjo los rendimientos más elevado en cada uno de los cinco racimos producidos en cada estación del año (Figura 3).

En primavera, se observó que el balance K : Ca óptimo debe ser de 0.78–0.82 al subir la RFA hasta un máximo de 102–142 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras con niveles de RFA más bajos o altos deben ir acompañados de una reducción en el balance K : Ca. Una tendencia similar fue observada durante el verano, pues valores extremos de RFA deben ir acompañados de un balance K : Ca de 0.55, mientras bajo una RFA de 479–475 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el balance debe ser de 0.78 (Figura 4).

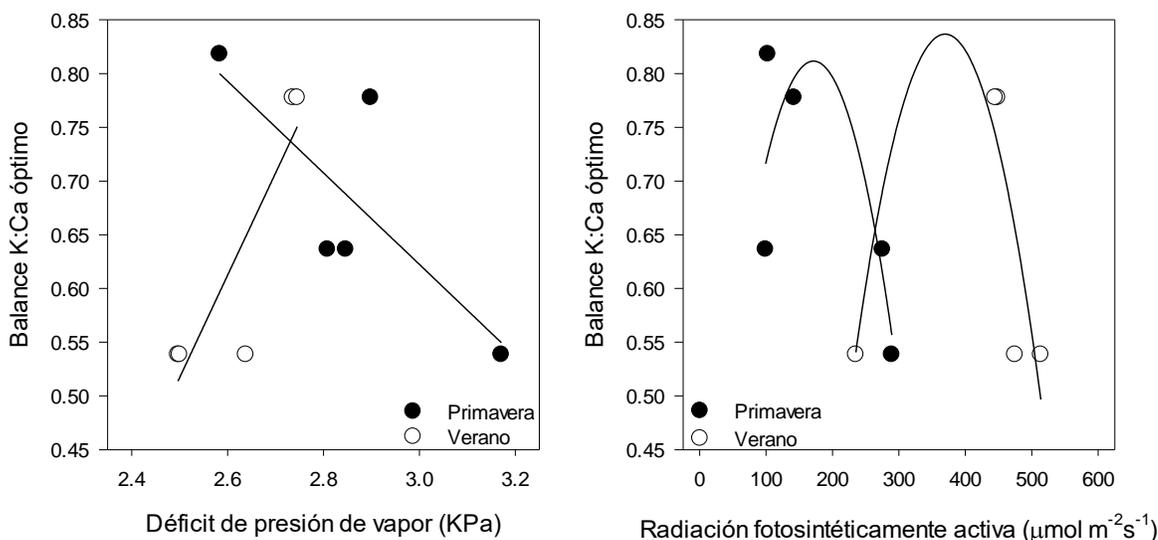


Figura 8. Relación entre el Déficit de Presión de Vapor y Radiación Fotosintéticamente Activa sobre el balance K : Ca bajo los cuales se obtuvieron los rendimientos más altos en cada uno de los cinco racimos evaluados en dos estaciones del año.

Considerando los datos obtenidos durante ambas estaciones de cultivo, el modelo que explica el efecto del DPV y la RFA así como la interacción entre ambos factores sobre el rendimiento es:

$$\text{Rendimiento de fruto (Kg planta}^{-1}\text{)} = -247.3 + 339.6 \text{ DPV} + 11.1 \text{ RFA} - 3.77 (\text{DPV} \times \text{RFA}), R^2 = 0.763, P < 0.001,$$

mientras que el modelo que explica el efecto del balance K : Ca en combinación con el DPV y RFA es:

Rendimiento de fruto (kg planta^{-1}) = $588.9 + 107.6 (\text{K: Ca} \times \text{DPV}) - 0.038 (\text{K: Ca} \times \text{RFA} \times \text{DPV})$, $R^2 = 0.416$, $P < 0.001$.

Leonardi *et al.* (2000) reportaron que en tomate el color de los frutos no fue afectado por el DPV; estos resultados coinciden con los observados en el presente estudio puesto que, además del color, otros parámetros de calidad como la firmeza no fueron afectados por el DPV prevaleciente en ninguna de las estaciones de cultivo ni por el balance K : Ca en la solución nutritiva (Cuadro 4 y 5). Sin embargo, la concentración de sólidos solubles en los frutos cosechados en el verano fue mayor al de los cosechados en primavera, aunque estos fueron reducidos significativamente cuando las plantas se nutrieron con soluciones conteniendo un balance K : Ca de 0.64 (Cuadro 4). Resultados similares han sido reportados por Leonardi *et al.* (2000) ya que con un alto DPV se produjo un incremento en los sólidos solubles en comparación con plantas crecidas en ambientes con un menor DPV.

Cuadro 4. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva sobre la calidad de frutos de tomate durante el desarrollo y cosecha del primero al quinto racimo de frutos en la primavera.

Balance		Sólidos solubles	*L	*a	*b
K : Ca	Firmeza	totales			
	(Kg/cm ²)	(° Brix)			
0.54	2.97	5.0	36.8	42.6	43.9
0.64	2.49	5.1	37.3	41.9	44.6
0.78	2.77	5.0	36.7	42.2	44.7
0.82	2.43	5.3	36.7	43.2	44.2
ANOVA	P = 0.53	P = 0.29	P = 0.45	P = 0.78	P = 0.66

Medias con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferente de acuerdo a la prueba Duncan con $p \leq 0.05$.

Cuadro 5. Efecto del balance K : Ca en la solución nutritiva sobre la calidad de frutos de tomate durante el desarrollo y cosecha del sexto al décimo racimo de frutos en el verano.

Balance K : Ca	Firmeza (Kg/cm ²)	Sólidos solubles totales (° Brix)	*L	*a	*b
0.54	2.95	6.3 b	35.1	39.4	40.6
0.64	2.89	5.6 c	35.2	39.9	41.3
0.78	2.88	6.0 bc	35.1	39.9	41.0
0.82	3.10	6.6 a	35.0	39.8	40.4
ANOVA	P = 0.83	P = 0.02	P = 0.97	P = 0.96	P = 0.49

Medias con letras diferentes en las columnas son estadísticamente diferente de acuerdo a la prueba Duncan con $p \leq 0.05$.

Respuestas agronómicas.

El peso fresco de tallo y total fue más alto en plantas desarrolladas durante la primavera y nutridas con soluciones conteniendo un balance K : Ca de 0.64 (Cuadro 2). Durante el verano, no se detectaron efectos significativos sobre la biomasa de las plantas (Cuadro 3). El mayor peso fresco total conforme se aumentó la proporción de Ca en relación a la de K puede explicarse por el efecto de este nutrimento en el estado hídrico de la plantas, lo que resultaría en un mayor contenido de agua (Peil y Galvez, 2005); estos resultados son similares a los reportados por Shabala y Pottosin (2014) y Shabani *et al.* (2012), quienes señalaron que concentraciones crecientes de K en la SN sobre tomate tipo cereza bajo condiciones salinas aumentó el crecimiento de las plantas.

CONCLUSIÓN GENERAL

El balance K : Ca mejoró el rendimiento y es afectado por las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla cada racimo y la estación del año. Las tendencias muestran que el rendimiento responde positivamente a un balance K : Ca de 0.64 combinado con un DPV de 2.81 kPa en primavera, mientras que en verano el balance óptimo fue el de 0.54 combinado con un DPV de 2.50 o 2.74 kPa. En primavera, un incremento en el DPV debe ir acompañado de una reducción en el balance K : Ca, mientras que en el verano debe ser lo opuesto. Con excepción de los sólidos solubles totales, la calidad de los frutos, así como la biomasa, no fue afectado significativamente.

REFERENCIAS

- Adams, P., & Ho, L. C. (1995). Uptake and distribution of nutrients in relation to tomato fruit quality. In I International Symposium on Solanaceae for Fresh Market, 412 (pp. 374-387).
- Adams, P., & Ho, L. C. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant and Soil*, 154, 127-132.
- Ahmad, I., & Maathuis, F. J. (2014). Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of plant physiology*, 171(9), 708-714.
- Airman, D. P., & Houter, G. (1990). Influence of radiation and humidity on transpiration: implications for calcium levels in tomato leaves. *Journal of Horticultural Science*, 65, 245-253.
- Almeselmani, M., Pant, R. C., & Singh, B. (2009). Potassium level and physiological response and fruit quality in hydroponically grown tomato. *International Journal Of Vegetable Science*, 16, 85-99.
- Andrade, J.L., De la Barrera, E., Reyes-García, C., Ricalde, M.F., Vargas-Soto, G., & Cervera, J.C. (2007): El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Bol. la Soc. Bot. México* 81, 37–50.
- Arellano-Gil, M., & Gutiérrez- Coronado, M. (2006): Rendimiento y calidad poscosecha de tomate bajo diferentes esquemas de fertilización al suelo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11, 233–239.
- Armengaud, P., Sulpice, R., Miller, A. J., Stitt, M., Amtmann, A. & Gibon. (2009). Multilevel analysis of primary metabolism provides new insights into the role of potassium nutrition for glycolysis and nitrogen assimilation in *Arabidopsis* roots. *Plant Physiol.* 772–785.
- ASABE Standard (ANSI/ASAE EP406.4) (2008). Heating, ventilating and cooling greenhouses, American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, MI, USA. Consultado: 13-agosto-2019. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.214.2050&rank=4>.

- Barker, J. C. (1990). Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of horticultural science*, 65(3), 323-331.
- Barrón, M. A., & Rello, F. (2000). The impact of the tomato agroindustry on the rural poor in México. *Agricultural Economics* 23:289–297.
- Baset, M.M.A. (2015): Nutrition of Crop Plants. pp. 6, 90 y 91. In *Plant Science Research and Practices*. New York.
- Betancourt, P., y F. Pierre. (2013). Extracción de macronutrientes por el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var. Alba) en casas de cultivo en Quíbor, estado Lara, *Bioagro* 25, 181–188.
- Bonilla, I. 2008. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. pp. 103-141. En: Azcon-Bieto, J. y M. Talón (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana, Madrid.
- Bugarín-Montoya, R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P., & García-Paredes, D. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra Latinoamericana* 20, 391–99.
- Caldeira, C. F., Bosio, M., Parent, B., Jeanguenin, L., Chaumont, F., & Tardieu, F. (2014). A hydraulic model is compatible with rapid changes in leaf elongation under fluctuating evaporative demand and soil water status. *Plant Physiology*, 164, 1718-1730.
- Casierra-Posada, F., & Aguilar-Avenidaño, O.E. (2008): Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez Quality of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.) harvested at different maturity stages. *Agronomía Colombiana*, 26, 300–307.
- Coletto, J.M. 1995. Crecimiento y desarrollo de las especies frutales. 2ª ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Cruz, E. S., Martín, M. R. Q., de la Rosa Ibarra, M., López, J. M., Mendoza, A. B., & Jiménez, L. I. (2002). Producción de plántula de tomate y pimiento con cubiertas de polietileno reflejante para disminuir la temperatura en invernadero. *Agrociencia*, 36, 305-318.
- de Boer H.J., Lammertsma E. I., Wagner-Cremer, F., Dilcher, D. L., Wassen, M. J., & Dekker S. C. (2011). Climate forcing due to optimization of maximal leaf

conductance in subtropical vegetation under rising CO₂. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108: 4041–4046.

Del Amor, F. M., & L. F. Marcelis. (2006). Differential effect of transpiration and Ca supply on growth and Ca concentration of tomato plants. *Scientia Horticulturae* 111: 17–23.

Demidchik, V. (2014): Mechanisms and physiological roles of K⁺ efflux from root cells. *Journal of Plant Physiology*, 171, 696–707.

Demidchik, V., & Maathuis, F. J. (2007). Physiological roles of nonselective cation channels in plants: from salt stress to signalling and development. *New Phytologist*. 175, 387-404.

Díaz, A., Cayón, G., & Mira, J. J. (2007). Metabolismo del calcio y su relación con la “mancha de madurez” del fruto de banano. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 25, 280-287.

Díaz, M., D. H. 2002. Fisiología de árboles frutales. Ed. AGT Editor, S. A. 1a Ed. México. Pp 225, 342, 325, 351.

Du, Q., Zhang, D., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2018). Effects of atmospheric and soil water status on photosynthesis and growth in tomato. *Plant, Soil and Environment*, 64, 13-19.

Dussi, M. C. (2007). Intercepción y distribución lumínica en agroecosistemas frutícolas. Árboles frutales. Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. Argentina: Ed. Gabriel O. Sozzi. Capítulo, 6, 229.

Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupheal, Y., Azzini, E., & Saccardo, F. (2006). Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 54, 4319-4325.

Favela, C. E.; Preciado, R. P. y Benavides, M. A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Cultivos sin suelo. Primera (Ed.). Torreón, Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Fischer, G. y J.O. Orduz-Rodríguez. 2012. Ecofisiología en frutales. pp. 54-72. En: I, G. (ed.). Manual para el cultivo de frutales en el trópico. Produmedios, Bogotá.

- Fricke, W. (2017). Water transport and energy. *Plant, Cell & Environment*, 40, 977-994.
- Garrity, D. P., Watts, D. G., Sullivan, C. Y., & Gilley, J. R. (1982). Moisture Deficits and Grain Sorghum Performance: Evapotranspiration yield relationships 1. *Agronomy Journal*, 74, 815-820.
- Gautier, H., Guichard, S., & Tchamitchian, M. (2001). Modulation of competition between fruits and leaves by flower pruning and water fogging, and consequences on tomato leaf and fruit growth. *Annals of Botany*, 88, 645-652.
- Gerardeaux, E., Jordan-Meille, L., Constantin, J., Pellerin, S., & Dingkuhn, M. (2010). Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by potassium deficiency in *Gossypium hirsutum* (L.). *Environmental and Experimental Botany*, 67, 451-459.
- Gilliam, M., Dayod, M., Hocking, B. J., Xu, B., Conn, S. J., Kaiser, B. N., & Tyerman, S. D. (2011). Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. *Journal of Experimental Botany*, 62, 2233-2250.
- Gislerød, H. R., & Adams, P. (1983). Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 21, 311-321.
- Hamamoto, S., & Uozumi, N. (2014). Organelle localized potassium transport systems in plants. *Journal of Plant Physiology*, 171, 743-747.
- Hao, X. and Papadopoulos, A.P. (2003). Effects of calcium and magnesium on growth, fruit yield and quality in a fall greenhouse tomato crop grown on rockwool. *Canadian Journal of Plant Science*, 83, 903-912.
- Harel, D., Fadida, H., Slepoy, A., Gantz, S., & Shilo, K. (2014). The effect of mean daily temperature and relative humidity on pollen, fruit set and yield of tomato grown in commercial protected cultivation. *Agronomy*, 4, 167-177.
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10, 4-10.

- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner's mineral nutrition of higher plants (pp. 135-189). Academic Press.
- Hernández Díaz, M. I., Chailloux Laffita, M., Moreno Placeres, V., Mojena Graverán, M., & Salgado Pulido, J. M. (2014). Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en la época de primavera-verano. *Cultivos Tropicales*, 35, 106-115.
- Herrera, A. L. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*, 17, 221-229.
- Hirschi, K. D. (2004). The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 136, 2438-2442.
- Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A., & Gilliam, M. (2016). Fruit calcium: transport and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 7, 569.
-
- Holder, R., & Cockshull, K. E. (1990). Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 65(1), 31-39.
- Iglesias, M. J., García-López, J., Collados-Luján, J. F., López-Ortiz, F., Díaz, M., Toresano, F., & Camacho, F. (2015). Differential response to environmental and nutritional factors of high-quality tomato varieties. *Food chemistry*, 176, 278-287.
- Iraqi, D., Gagnon, S., Dubé, S., & Gosselin, A. (1995). Vapor pressure deficit (VPD) effects on the physiology and yield of greenhouse tomato. *HortScience*, 30, 846E-846.
- Janse J. and Welles G.W.H., 1984. Effects of energy saving measures on keeping quality of tomato and cucumber fruits. In Symposium on Quality of Vegetables. Jun 18. 163, 261-270.
- Jolliet, O., & Bailey, B. J. (1992). The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 43-62.
- Jones, J. W., Kenig, A., & Vallejos, C. E. (1999). Reduced state-variable tomato growth model. *Transactions of the ASAE*, 42, 255.

- Kanai, S., Ohkura, K., Adu-Gyamfi, J. J., Mohapatra, P. K., Nguyen, N. T., Saneoka, H., & Fujita, K. (2007). Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress. *Journal of Experimental Botany*, 58, 2917-2928.
- Karley, A. J., & White, P. J. (2009). Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current Opinion In Plant Biology*, 12, 291-298.
- Kays, S. J. (1991). *Postharvest physiology and handling of perishable plant products*. Van Nostrand Reinhold Inc.
- Lawn, R. J. (1982). Response of four grain legumes to water stress in south-eastern Queensland. III. Dry matter production, yield and water use efficiency. *Australian Journal of Agricultural Research*, 33, 511-521.
- Leonardi, C., Guichard, S., & Bertin, N. (2000). High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 84, 285-296.
- Liu, F., Cohen, Y., Fuchs, M., Plaut, Z., & Grava, A. (2006). The effect of vapor pressure deficit on leaf area and water transport in flower stems of soil-less culture rose. *Agricultural Water Management*, 81, 216-224.
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (DPV) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17-23.
- Marschner, P., & Rengel, Z. (2012). Nutrient availability in soils. In Marschner's mineral nutrition of higher plants (pp. 315-330). Academic Press.
- Martínez, J. R., Vicente, A. A., Saenz, J. C. M., Herrera, R. R., & González, C. N. A. (2012). Un tesoro percedero en Mexico: el tomate, tecnologías para prolongar su vida de anaquel. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (54), 57-63.
- Mavi, H.S. y G.J. Tupper. 2004. *Agrometeorology. Principles and applications of climate studies in agriculture*. Food Products Press, New York, NY.

- McAdam, S. A., & Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171, 2008-2016.
- Nieves-Cordones, M., Alemán, F., Martínez, V., & Rubio, F. (2014). K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. *Journal of Plant Physiology*, 171, 688-695.
- Nuez, F. 1995. *El cultivo del tomate*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Nukaya, A., Goto, K., Jang, H., Kano, A., & Ohkawa, K. (1995). Effect of K/Ca ratio in the nutrient solution on incidence of blossom-end rot and gold specks of tomato fruit grown in rockwool. *Hydroponics and Transplant Production* 396, 123-130.
- Paiva, E. A. S., Sampaio, R. A., & Martinez, H. E. P. (1998). Composition and quality of tomato fruit cultivated in nutrient solutions containing different calcium concentrations. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 2653-2661.
- Parra Terraza, S., Villarreal Romero, M., Sánchez Peña, P., Corrales Madrid, J. L., & Hernández Verdugo, S. (2008). Efecto del calcio y potencial osmótico de la solución nutritiva en la pudrición apical, composición mineral y rendimiento de tomate. *Interciencia*, 33, 449-456.
- Parra-Coronado, A., Miranda, D. (2016): a los factores climáticos en el cultivo Postharvest quality response of fruits to preharvest climatic factors. *Agronomía Colombiana*, 34, 1415–1418.
- Peil R. M., & Galvez, J. (2005). Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *Current Agricultural Science and Technology*, 11(1).
- Pérez, A. R., & Quintero, E. M. (2015). Funciones del calcio en la calidad poscosecha de frutas y hortalizas: una revisión. *Alimentos Hoy*, 23, 13-25.
- Pinto, E., & Ferreira, I. M. (2015). Cation transporters/channels in plants: tools for nutrient biofortification. *Journal of Plant Physiology*, 179, 64-82.
- Rajendran, C., Ramamoorthy, K., & Hepziba, S. J. (2009). *Nutritional and physiological disorders in crop plants*. Scientific Publishers (India).

- Reyes, A. J., Álvarez-Herrera, J. G., & Fernández, J. P. (2013). Papel del calcio en la apertura y el cierre estomático y sus interacciones con solutos compatibles. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7, 111-122.
- Rubio, J. S., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F., & Martinez, V. (2009). Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K⁺ and Ca²⁺ fertilization. *Scientia Horticulturae*, 119, 79-87.
- Schneider, A., & Mollier, A. (2016). Modelling of K/Ca exchange in agricultural soils. *Geoderma*, 271, 216-224.
- Shabala, S., & Pottosin, I. (2014). Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implications for abiotic and biotic stress tolerance. *Physiologia Plantarum*, 151, 257-279.
- Shabani, E., Tabatabaei, S. J., Bolandnazar, S., & Ghasemi, K. (2012). Vegetative growth and nutrient uptake of salinity stressed Cherry tomato in different calcium and potassium level. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3, 1845-1853.
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32, 287-302.
- SIAP. 2017. Atlas Agroalimentario 2017. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2017.2/July/2019.
- Stockle, C. O., & Kiniry, J. R. (1990). Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field Crops Research*, 25(3-4), 171-181.
- Suzuki, M., Umeda, H., Matsuo, S., Kawasaki, Y., Ahn, D., Hamamoto, H., & Iwasaki, Y. (2015). Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, 187, 44-49.
- Van den Broeck, G., & Maertens, M. (2016). Horticultural exports and food security in developing countries. *Global Food Security*, 10, 11-20.

- Van Ploeg, D., & Heuvelink, E. (2005). Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(6), 652-659.
- Véry, A. A., Nieves-Cordones, M., Daly, M., Khan, I., Fizames, C., & Sentenac, H. (2014). Molecular biology of K⁺ transport across the plant cell membrane: what do we learn from comparison between plant species?. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 748-769.
- Villegas-Torres, O. G., Sánchez-García, P., Baca-Castillo, G. A., Rodríguez-Mendoza, M. N., Trejo, C., Sandoval-Villa, M., & Cárdenas-Soriano, E. (2005). Crecimiento y estado nutricional de plántulas de tomate en soluciones nutritivas con diferente concentración de calcio y potencial osmótico. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 49-56.
- Wang, S. Y. (2006, August). Effect of pre-harvest conditions on antioxidant capacity in fruits. In *IV International Conference on Managing Quality in Chains-The Integrated View on Fruits and Vegetables Quality 712* (pp. 299-306).
- Xu, H. L., Iraqi, D., & Gosselin, A. (2006). Effect of ambient humidity on physiological activities and fruit yield and quality of greenhouse tomato. In *XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: International Symposium on Advances in Environmental Control, Automation 761* (pp. 85-92).
- Zago, L., Zugasti, B., Zuleta, Á., Presner, N., Lobbe, V., & De La Plaza, M. (2017): Critical analysis of fructose consumption part one the fructose on nutrition. metabolic aspects. *Actual. en Nutr.* 18, 26–36.
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7, 43461.
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015). Regulation of vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. *PloS One*, 10(7), e0133919.
- Zolnier, S., Gates, R. S., Buxton, J., & Mach, C. (2000). Psychrometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(3), 343-359.

Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture—status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656-669.